УДК 537.533

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОСБЕРЕГАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

П.С. Ананьин, О.Х. Асаинов, Г.А. Блейхер, Д.Д. Баинов, В.В. Жуков, А.А. Зоркальцев, Л.Г. Косицын, В.П. Кривобоков, Е.В. Лебедев, В.Н. Легостаев, С.В. Меркулов, М.Н. Михайлов, М.А. Нечаев, Т.Г. Носкова, О.В. Пащенко, А.Г. Пузыревич, С.П. Умнов, С.В. Юдаков, С.Н. Янин

НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете
E-mail: krivobokov@npi.tpu.ru

Описана плазменная установка для нанесения теплоотражающих (низкоэмиссионных) покрытий на поверхность листового стекла. Она имеет вакуумные камеры, в которых размещены источники плазмы магнетронного типа и ионных пучков для очистки обрабатываемых изделий. Содержит устройство оптического контроля толщины покрытий, систему сканирования обрабатываемых изделий относительно пучков ионов и потоков плазмы, шлюзовую камеру для их загрузки и другие устройства, обеспечивающие высокое качество покрытий. Описаны её структура, характеристики основных элементов, технические параметры, некоторые особенности эксплуатации.

Введение

Известно, что в России на поддержание теплового, светового и воздушного комфорта ежегодно расходуется около 250 млн т. условного топлива, что составляет примерно четверть всей потребляемой энергии [1]. Основная часть ее (>70 %) обусловлена нуждами отопления, что связано с особенностями географического положения страны. Энергопотребление на одного жителя составляет около 8 т условного топлива в год (в 3 раза выше среднемирового уровня).

Борьба с потерями тепла очень актуальна, так как из-за высоких цен на топливо (они быстро приближаются к мировым) доля топливной компоненты в стоимости товаров, произведенных в России, непомерно велика. Снижение потерь энергии – это один

из наиболее эффективных путей повышения конкурентоспособности российской экономики.

Основным каналом потерь тепла являются остекленные оконные проёмы зданий и сооружений. На их долю приходится 30...60 % (в зависимости от соотношения площади стен и окон) в северных и 15...20 % в южных районах страны. Из этих данных следует, что примерно 8 % всей вырабатываемой в России энергии (около 80 млн. т условного топлива) теряется в результате плохих теплоизолирующих свойств оконных проемов. Поэтому окна представляют собой один из наиболее благоприятных объектов с точки зрения энергосбережения.

Главным параметром, характеризующим потери тепла из здания, является сопротивление теплопередаче R, которое учитывает все основные каналы его переноса (кондуктивный, конвективный, радиационный) и характеризует качество теплоизолирующих свойств конструкции: $R=T/\Phi$, м^2·°С/Вт, где T – перепад температуры снаружи и внутри здания, °С; Ф – тепловой поток на единицу площади, Вт/м^2. Не останавливаясь на особенностях методик вычисления (измерения) R, отметим, что сегодня проблема подавления конвективных и кондуктивных процессов решается чисто технически (использование теплоизолирующих материалов, вакуумных стеклопакетов и т.д.). В этой ситуации радиационная компонента является доминирующей. Её доля в общем потоке теряемой энергии может превышать 70 %. Поэтому есть большой интерес к технологиям, позволяющим минимизировать эти потери.

Стандартный приём здесь – использование так называемых теплоотражающих покрытий (ТОП); в иностранной литературе распространён термин "низкоэмиссионные", которые прозрачны для видимого света и непрозрачны для инфракрасного излучения. Они представляют собой слоистые структуры из полупроводниковых материалов или тонких металлических плёнок, просветлённых оксидами металлов, которые наносят с помощью магнетронных источников плазмы [2].

Некоторые развитые страны мира (Германия, США и др.) давно и успешно разрабатывают и производят установки для нанесения ТОП на поверхность листового стекла. В основном это – технологические линии производительностью 1...10 млн кв. м в год и ценой 10...100 млн USD (т.е. удельная стоимость оборудования составляет примерно 10 и более USD на 1 м^2 годовой производительности) [3]. В России из-за экономических трудностей, малого количества потребителей на единицу площади (отсюда – необходимость перевозки обработанного стекла на большие расстояния), а также по ряду других причин, есть интерес к относительно небольшим установкам производительностью примерно 100...200 тыс. м^2 в год с удельной стоимостью в пределах 4...5 USD на 1 м^2 годовой производительности.

Цель настоящей работы – описать подобную установку, разработанную в 2001–2002 гг. в Научно-исследовательском институте ядерной физики при Томском политехническом университете.

1. Принцип действия и конструкция

Нами выполнен цикл исследований по разработке плазменных установок для модифицирования оптических свойств листового стекла [4–6], впоследствии названных "Опал".

У машин этой системы в качестве рабочих органов использованы вертикально установленные планарные магнетроны на постоянном токе и источники ионов с замкнутым дрейфом электронов [7], которые являются средством очистки поверхности стекла перед нанесением покрытий. Листы стекла, предназначенные для обработки, помещаются попарно в вертикальную кассету, которая совершает возвратно-поступательные движения в вакууме вдоль рабочих органов в соответствии с заданным технологическим режимом.

Такой подход был разработан ранее с целью минимизировать затраты на изготовление установки [8]. Он отличается от схем [9, 10], где движется не стекло, а каретка с рабочими органами.

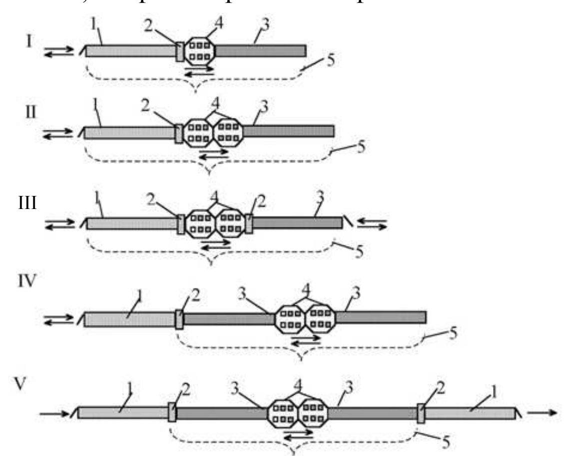


Рис. 1. *Архитектура установок "Опал": 1) шлюз; 2) щелевой затвор; 3) реверсивная камера; 4) рабочая камера; 5) зона перемещения кассеты со стеклом при обработке*

Установки "Опал" выполнены по модульному принципу и состоят из элементов, количество и положение которых могут изменяться в зависимости от характера производимой продукции и требований к производительности. Соедениение смежных узлов и модулей осуществляется с помощью фланцев.

На рис. 1 представлены варианты конфигурации установок серии "Опал".

<u>Вариант I.</u> Машина этого типа представляет собой набор следующих элементов: **шлюз – затвор – рабочая камера – реверсивная камера**.

Главным узлом её является рабочая камера, содержащая ионные источники и магнетроны. В ней происходит процесс обработки поверхности изделия. Все остальные устройства выполняют вспомогательную роль.

Реверсивная камера необходима для того, чтобы принять кассету из рабочей камеры при обработке стекла за несколько проходов, т.к. при перемене направления движения происходит её крат-

ковременная остановка и на поверхности стекла возникают полосы из-за неравномерности толщины наносимого покрытия. Поэтому необходимо удалять кассету из зоны действия магнетронов. Роль реверсивной камеры в некоторых случаях может выполнять шлюзовая камера, через которую осуществляется загрузка.

Недостаток данной схемы – большая продолжительность рабочего цикла из-за того, что при загрузке и выгрузке каждый раз приходится открывать шлюзовую камеру и это приводит к большим потерям рабочего времени при вакуумировании машины. Она соответствует наиболее дешевому варианту установки, но имеет низкую производительность.

Вариант II. Архитектура установки определяется следующим набором элементов: **шлюз – затвор – блок рабочих камер – реверсивная камера.**

Увеличение числа рабочих камер существенно повышает производительность установки в целом за счёт дополнительных магнетронов.

Вариант III является развитием варианта II: **шлюз – затвор – блок рабочих камер – затвор – шлюз.**

Данная установка позволяет производить загрузку и выгрузку с обеих сторон, и это удобно. Но расчёты показывают, что производительность её почти равна производительности по схеме варианта II, в то время как дополнительный крупноформатный затвор существенно удорожает конструкцию.

Вариант IV реализован в виде установки "Опал-3" и предполагает **шлюз – затвор – реверсивная камера – блок рабочих камер – реверсивная камера**.

По этой схеме между затвором и блоком рабочих камер появилась реверсивная камера, что дало возможность вести обработку изделий одновременно с разгрузкой или загрузкой. В установке "Опал-3" загрузочная камера рассчитана на две кассеты, одна из которых находятся в шлюзе, а вторая – в рабочей зоне.

В данном случае время перегрузки и откачки шлюза частично или полностью перекрывается по времени с процессом нанесения покрытия. Это обстоятельство сокращает производственный цикл, но появляются дополнительные затраты из-за усложнения конструкции.

Вариант V. Он предполагает следующую схему: **шлюз – затвор – реверсивная камера – блок рабочих камер – реверсивная камера – затвор – шлюз.**

Это наиболее дорогая конструкция, но она дает наибольшую производительность, так как позволяет наносить покрытие в проходном режиме (стекло загружается с одной стороны, а выходит из установки с другой). Этот вариант позволяет, добавляя рабочие камеры, организовать однопроходный рабочий цикл (нанесение покрытия осуществляется за один проход кассеты).

Рабочий цикл (на примере варианта V) состоит из операций, перечисленных ниже.

1. Загрузка кассеты с обрабатываемым изделием во входной шлюз. В это время щелевой затвор закрыт, а рабочие камеры находятся под вакуумом и магнетроны уже подверглись тренировке.
2. Дверь шлюза закрывается и производится его вакуумирование.
3. Щелевой затвор открывается, и кассета поступает в реверсивную камеру. Параллельно вакуумируется выходной шлюз.
4. После этой процедуры щелевой затвор закрывается, во входной шлюз напускается воздух. Далее входной шлюз функционирует по п. 1.
5. Кассета движется из одной реверсивной камеры в другую и обратно через рабочие камеры, где изделия подвергаются обработке ионными пучками и плазмой магнетронного разряда.
6. После завершения процедуры обработки изделие выводится в выходной шлюз и второй затвор закрывается.
7. В это же время вторая кассета перемещается из входного шлюза в реверсивную камеру, далее по п. 4.
8. В выходной шлюз напускается воздух и находящееся в нём обработанное изделие извлекается из установки. Далее он снова вакуумируется.
9. В это же время происходит обработка изделия, помещённого во вторую кассету. Далее по п. 6.

Таким образом, загрузка изделий, их обработка и выгрузка происходят одновременно. Это существенно повышает производительность установки.

2. Основные узлы и системы установки "Опал-3"

Ниже на примере установки "Опал-3" (вариант IV) кратко описаны основные рабочие элементы и системы. Общий вид её (с вспомогательным оборудованием) приведен на рис. 2.



Рис. 2. *Установка "Опал-3"*

Вакуумная система. Суммарный вакуумируемый объём установки составляет 6 $м^3$, а площадь корпусных элементов – около 80 $м^2$. Она содержит трубопроводы, корпусные элементы, затворы, клапаны, датчики контроля давления.

Основные средства откачки: двухроторные насосы ДВН-150 (известные как насосы Рутца), пластинчато-роторные насосы НВР-250Д и два диффузионных насоса НВДМ-630 (быстрота действия 16 м³/с), оборудованных водяными ловушками.

Для сокращения продолжительности перегрузки на шлюзе установлен дополнительный диффузионный насос НВДР-400 (быстрота действия около 6 м³/с).

Корпусные элементы, щелевой затвор и кассеты. Изготовление корпусных изделий из нержавеющей стали больших размеров представляет собой существенную технологическую проблему. Их сборка производилась с использованием специальных шаблонов и монтажных приспособлений.

Ионные источники. Ионные источники с замкнутым дрейфом электронов выполнены в виде прямоугольников с внутренним расположением магнитов и охлаждаемого водой анода [7]. Рабочий газ (обычно аргон или его смеси с др. газами) подаётся во внутреннюю полость. Этот же элемент служит для инжекции рабочего газа магнетронов в камеру.

Два ионных источника ленточного типа длиной около 2500 мм расположены в первой рабочей камере (рис. 3) и предназначены для создания высокоэнергетического потока ионов, который очищает поверхность обрабатываемого материала (стекла). Благодаря этому с поверхности удаляются адсорбированные атомы, плёнка влаги и другие загрязнения, оказывающие негативное воздействие на адгезию напыляемого материала по отношению к стеклу.

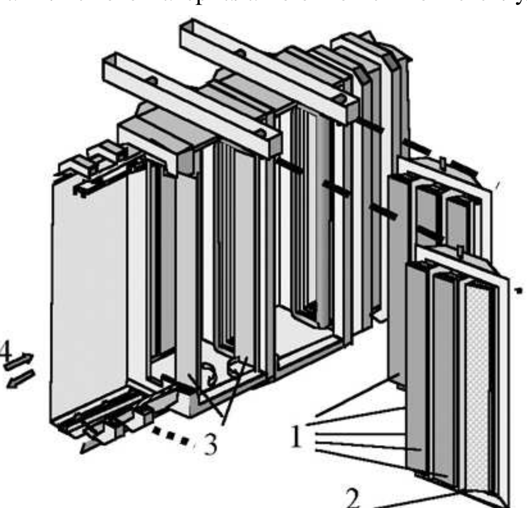


Рис. 3. *Рабочие камеры: 1) магнетроны; 2) источник питания; 3) экран; 4) стекло*

Иногда ионная обработка полезна для активации химических связей на поверхности. Это тоже способствует улучшению адгезии и стабильности плёнок.

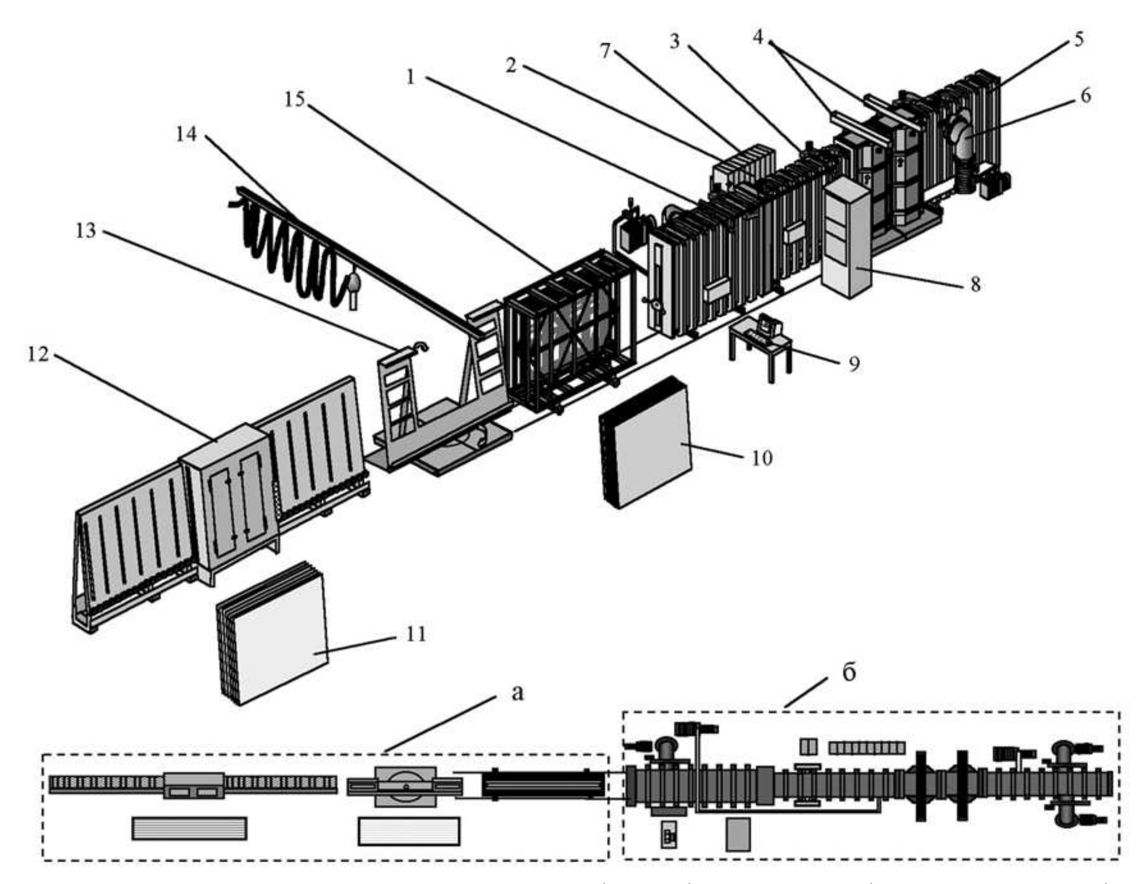


Рис. 4. *Технологическая линия на базе установки "ОПАЛ-3": 1) шлюз; 2) щелевой затвор; 3) реверсивная камера I; 4) рабочая камера; 5) реверсивная камера II; 6) диффузионный насос; 7) источники питания; 8) пульт управления; 9) рабочее место оператора; 10) стекло, прошедшее обработку; 11) стекло необработанное; 12) моечная машина; 13) разворотное устройство; 14) грузоподъемное устройство; 15) каретка с кассетами; а) зона подготовки стекла; б) зона плазменной обработки*

Магнетроны планарного типа выполнены в виде протяжённых прямоугольников и подвешены вертикально в рабочих камерах. Мишени размером 2500×100×8 имеют прямое охлаждение и крепятся к корпусу, в котором расположена магнитная система на основе ферритовых магнитов.

Источники питания магнетронов имеют следующие максимальные параметры: выходное напряжение – 700 В; выходной ток – 40 А. Средняя выходная мощность – 20 кВт; время срабатывания защиты от короткого замыкания – не более 2 мкс; точность стабилизации тока или напряжения – не хуже 1 %.

Возможны варианты использования цилиндрических магнетронов [11], магнетронов с дополнительными магнитами для улучшения пространственного распределения толщины наносимых покрытий [12], с анодами, снабжёнными инжекционными отверстиями [13] и других.

Таблица. *Функциональные характеристики установки "Опал-3"*

Максимальный размер стекла, мм	2134 3050 10
Число магнетронов, шт.	10
Число ионных источников, шт.	2
Количество одновременно обрабатываемых листов стекла, шт.	2
Скорость движения каретки со стеклом, мм/с	2...80
Максимальное остаточное давление газа, Па	$6 \cdot 10^{-3}$
Рабочая длина магнетронов, мм	2500
Пример структуры наносимого теплоотражающего покрытия (в{} – состав слоев покрытия)	{TiO_2 (или SnO_2)} – {Ni-Cr} – {Ag} – {Ni-Cr} – {TiO_2 (или SnO_2)}
Средняя скорость роста модифицирующего покрытия на единицу потребляемой мощности установки, (мкм/час)/(кВт·$м^2$)	$3{,}3 \cdot 10^{-5}$
Производительность установки при осаждении покрытий (в зависимости от их типа), $м^2$/ч: а) теплоотражающих; б) тонирующих	 15...30 30...60
Расход рабочего газа, л/ч	60
Напряжение питания ионного источника, кВ	1...3,5
Ток ионного источника, А	0,1...2,0
Средняя плотность тока ионов, А/$м^2$	2,0
Напряжение питания магнетронов, В	150...700
Ток магнетрона, А	1...40
Максимальная мощность, потребляемая установкой, кВт	150
Занимаемая площадь, $м^2$	200

Система напуска газа. Стабильность работы магнетронов существенно зависит от постоянства параметров газовой среды в рабочей камере. В установках серии "Опал" созданы условия для равномерной подачи газа к магнетронам. При этом в качестве инжекторов использованы ионные источники, а исполнительными устройствами служили регуляторы расхода газа типа 1179F фирмы MKS Instruments Deutschland.

Охлаждение установки. Магнетроны, ионные источники, диффузионные и форвакуумные насосы, водяные ловушки нуждаются в охлаждении. Оно может быть выполнено на основе внешних источников водоснабжения или замкнутого контура оборотного водоснабжения. Расход охлаждающей воды контролируется непрерывно.

Привод перемещения кассеты. Перемещение кассеты осуществляется цепной передачей, с электромеханическим приводом. Ввод вращения выполнен через уплотнение Вильсона, которое показало высокую надежность. Приводной вал оканчивается звездочкой, которая входит в зацепление с роликовой цепью, закрепленной на кассете.

Система управления. Установка снабжена автоматической системой управления на базе программируемых логических контроллеров и персонального компьютера. Компьютер визуализирует технологический процесс, обеспечивает оператору удобный интерфейс управления параметрами, протоколирует режимы выполнения операций, содержит справочные материалы, инструкции и другие документы, регламентирующие эксплуатацию установки, обслуживание и ремонт.

Есть возможность включения управляющего компьютера в сеть Интернет.

На рис. 4 изображён технологический участок на базе установки "Опал-3" (см. также табл.) по нанесению ТОП.

3. Работа установки в технологическом режиме

Установка адаптирована к ТОП на основе серебра: {TiO_2} [32 нм] – {Ni (80 %) – Cr (20 %)} [1 нм] – {Ag} [10нм] – {Ni-Cr} [1 нм] – {TiO_2}} [36 нм]. Используется стекло марки М1 по ГОСТ 111-90 и ему подобное.

Напылению ТОП предшествует обработка поверхности пучком ионов аргона с энергией около 1 кэВ. Исследования показали, что при отсутствии значительных загрязнений эффективность ионного травления существенно выше, чем химическая обработка.

Установка снабжена специальной оптической приставкой на базе монохроматора МУМ-1, которая позволяет контролировать толщину каждого слоя и вносить необходимые поправки в скорость напыления (требование стабильности толщины слоев составляет около ±3 %).

Процесс начинается с напыления пленки TiO_2. Режим работы магнетронов подобран таким образом, что требуемая толщина пленки первого слоя (32 нм) достигаться за четное число проходов каретки со стеклом через рабочие камеры. При этом есть возможность контролировать и сравнивать сигнал от исходного стекла (рис. 5, точка 1) и стекла с покрытием после осаждения каждого из слоев (рис. 5, точки 2–4).

Если напыление ведется без отклонения от нормы, то сигнал, соответствующий потоку света, отражённому от стекла, после напыления первого слоя TiO_2 увеличивается в 1,65 раза.

После напыления слоя TiO_2 происходит автоматическое выключение магнетронов с Ti-катодами,

закрытие клапанов напуска газов (Ar и O_2). Далее выдерживается пауза (≈30 с) для откачки оставшихся газов из камеры, после чего включаются магнетроны с мишенями из сплава Ni-Cr для напыления барьерного слоя. Барьерный пласт Ni-Cr предохраняет пленку серебра от окисления ионами кислорода, входящими в состав плазмы. Программа включения каждого магнетрона предусматривает контроль прохождения соответствующих подготовительных команд.

В соответствии с программой включения тренировка Ni-Cr катодов осуществляется в течение 20 с, после чего осуществляется напыление слоя Ni-Cr, при этом кассета со стеклами перемещается в реверсивную камеру.

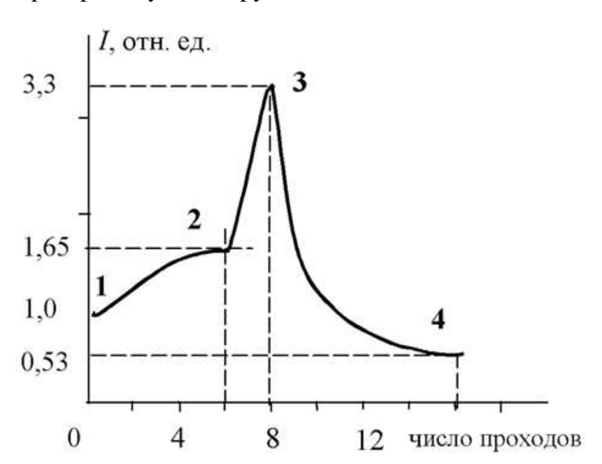


Рис. 5. *Зависимость сигнала, отраженного от образца стекла в процессе напыления 5-слойного ТОП, от количества проходов, где: 1) отражение исходного стекла;2) после напыления слоя TiO_2 толщиной 32 нм; 3) после дополнительного напыления слоя Ni-Cr толщиной 1 нм и слоя серебра толщиной 11 нм; 4) после дополнительного напыления слоя Ni-Cr толщиной 1 нм и TiO_2 толщиной 32 нм*

По аналогичному алгоритму происходит напыление слоя серебра.

После того, как кассета со стеклом достигнет датчика конечного положения в загрузочной камере, происходит измерение сигнала от стекла (точка 3, рис. 5), при этом сигнал должен в 3,3 раза превышать исходное отражение от стекла.

Напыление внешнего слоя Ni-Cr ничем не отличается от аналогичного внутреннего слоя.

Особенностью напыления внешнего слоя TiO_2 является то, что напыление прекращается при достижении минимального отражения от стекла (контроль отраженного сигнала ведется при λ=400 нм).

Обработанное по такой методике стекло имеет коэффициент пропускания в видимой области 82...84 % и коэффициент отражения в ИК-области (λ=10 мкм) примерно 91 %.

Тепловое сопротивление однокамерного стеклопакета с таким стеклом составляет 0,63 $м^2\cdot°С/Вт$.

Заключение

Разработана серия плазменных установок по нанесению покрытий, модифицирующих оптические свойства листового стекла.

Испытания показали, что система "Опал-3" способна производить примерно 100 тыс. кв. м стекла с ТОП в год. Срок окупаемости производственного участка на ее основе составляет не более 2,5 лет. Помимо этого, с ее помощью можно наносить цветные покрытия с заданным спектром пропускания, а также многослойные металлические радиоотражающие покрытия (например, на корпуса мобильных телефонов).

Основным результатом проекта "Опал-3" была отработка структурной организации установки, а также конструкций отдельных элементов и узлов. Авторы полагают, что есть ресурсы дальнейшего улучшения параметров этой установки. В первую очередь, следует отметить необходимость оптимизации конструкции магнетронов и функциональных характеристик системы управления, которая позволяет минимизировать непроизводительные потери времени.

Другим важным аспектом является изучение возможности использования установки для нанесения двойных ТОП [14], которые обладают более высокими оптическими параметрами. Технология их получения не требует внесения конструктивных изменений, но приводит к некоторому снижению производительности машины.

Установка "Опал-3" будет служить основой для создания более совершенных систем аналогичного типа.

Авторы благодарят сотрудников НИИ ядерной физики при ТПУ и Томского политехнического университета, оказавших содействие в разработке установки "Опал-3".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реутов Б.Ф., Слепцов В.В., Пыжов И.Н., Арбузов В.В. Покрытия на стекле и полимерной плёнке // Российские энергоэффективные технологии. – М.: ЗАО "Фабрика офсетной печати", 2002. – Вып. № 1 (4). – 48 с.
2. Спиридонов А.В. Современное состояние и перспективы совершенствования светопрозрачных ограждений // Строительные материалы. – 1998. – № 7. – С. 4–6.
3. Pulker H.K. Coating on Glass. – Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier Science Publisher, 1984. – 484 p.
4. Ананьин П.С., Асаинов О.Х., Блейхер Г.А., Зубарев С.М., Косицын Л.Г., Кривобоков В.П., Кузьмин О.С., Легостаев В.Н., Падусенко А.Н., Пащенко О.В., Рычков Д.С., Янин С.Н. Разработка технологий модификации поверхности твёрдого тела с помощью магнетронных распылительных систем в НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете // Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах: Тез. докл. 2-й Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – С. 271–277.
5. Ananin P., Asainov O., Bleikher G., Zubarev S., Kositsyn L., Krivobokov V., Kuzmin O., Legostaev V., Padusenko A., Paschen-

ko O., Rychkov D., Yanin S. Development of Solid Surface Modification Technologies on the Base of Magnetron Plasma Sources in Nuclear Physics Institute at Tomsk Polytechnic University // Proc. of the 4th Korea-Russian Intern. Symp. of Science and Techn. KORUS-2000. — Ulsan, Republic of Korea, June 27-July 1, 2000. — Part 3: Mechanic Parts and Material Processing. — P. 215—219.

6. Ananin P., Asainov O., Bleikher G., Kositsyn L., Krivobokov V., Kuzmin O., Legostaev V., Padusenko A., Paschenko O., Rychkov D., Yanin S. Research of Surface Modification Technologies Using Magnetron Plasma Source // Proc. of 1st Intern. Congr. on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification Materials. — Tomsk, Russia, September 24—29, 2000. — V. 1. — P. 284—286.
7. Янин С.Н., Кривобоков В.П., Жуков В.В., Лелеков М.А. Применение ионного ассистирования в магнетронном напылении оксидных плёнок // Proc. of 6th Intern. Conf. on Modification Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Sept. 23—28. — Tomsk, Russia, 2002. — P. 544—546.
8. Сочугов Н.С., Бугаев С.П., Ковшаров Н.Ф., Ладыженский О.Б. Технологическая установка ВНУК для нанесения теплоотражающих покрытий на архитектурные стёкла // Proc. of 6th Intern. Conf. on Modification Materials with Particle Beams and Plasma Flows. — Tomsk, Russia, Sept. 23—28, 2002. — P. 43—46.
9. Патент 2138094 РФ. МКИ H01J 37/317, C23C 14/35. Установка для нанесения тонкослойных покрытий / П.С. Ананьин, О.Х. Асаинов, С.М. Зубарев, В.П. Кривобоков, О.С. Кузьмин. Заявлено 04.02.1997; Опубл. 20.09.1999, Бюл. № 26. — 5 с.: ил.
10. Патент 2151439 РФ. МКИ H01J 37/317, 37/34. Магнетронная распылительная система / П.С. Ананьин, В.П. Кривобоков, О.С. Кузьмин, В.Н. Легостаев. Заявлено 12.03.1998; Опубл. 20.06.2000, Бюл. № 17. — 4 с.: ил.
11. Патент 2107970 РФ. МКИ H01J 37/317, 37/34, C23C 14/35. Магнетронная распылительная система / В.П. Кривобоков, О.С. Кузьмин, В.Н. Легостаев. Заявлено 13.12.1995; Опубл. 27.03.1998, Бюл. № 9. — 5 с.: ил.
12. Патент 2107971 РФ. МКИ H01J 37/317, 37/34, C23C 14/35. Магнетронная распылительная система / П.С. Ананьин, В.П. Кривобоков, О.С. Кузьмин, В.Н. Легостаев. Заявлено 09.07.1996; Опубл. 27.03.1998, Бюл. № 9. — 5 с.: ил.
13. Патент 2220226 РФ. МКИ C23C 14/35. Магнетронная распылительная система / В.В. Жуков, В.П. Кривобоков, С.Н. Янин. Заявлено 12.04.2002; Опубл. 27.12.2003, Бюл. № 36. — 4 с.: ил.
14. Баинов Д.Д., Кривобоков В.П., Легостаев В.Н. Оптимизация параметров плазменных теплоотражающих покрытий // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 2. — С. 29—33.

УДК 537.2:533.922